

Selbstverdichtender Beton in der Praxis

1 Einführung

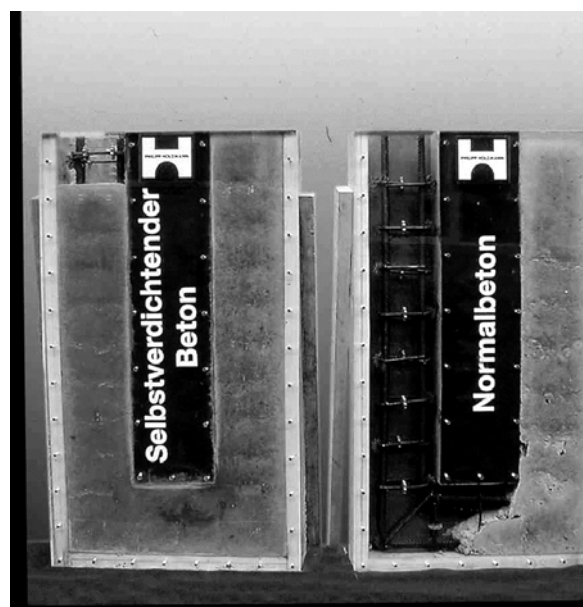
Betonbauwerke können nur dann dauerhaft die hohen Beanspruchungen aufnehmen, wenn das Betongefüge mehr oder weniger fehlerstellenfrei ist. Dies betrifft sowohl die Mikrostruktur mit den feinsten Kapillarporen als auch die Makrostruktur, in der größere Verdichtungsstellen die geforderten Eigenschaften beeinträchtigen würden. Für ersteres muss der maßgebende Wassergehalt nach oben begrenzt werden. Durch die damit verbundene Einschränkung des Wassergehalts ist in der Regel nur eine vergleichsweise steife bis bestenfalls plastische Konsistenz des Frischbetons erreichbar. Um auch in solchen Betonen Makroporen auszuschalten, ist eine mehr oder weniger intensive Verdichtung des eingebauten Frischbetons notwendig. Verflüssigende Zusatzmittel ermöglichen es bisher schon, die Frischbetonskonsistenz bei Einhaltung der zulässigen Wassergehalte deutlich weicher einzustellen. Die notwendige Verdichtungsenergie kann dadurch erheblich reduziert werden, auf einen gewissen Verdichtungsanfall kann aber bis heute nicht verzichtet werden.

Mit der Entwicklung von selbstverdichtendem Beton, die vor rd. 10 Jahren mit ersten Untersuchungen und Überlegungen in Japan begann, zeichnet sich ein nahezu revolutionärer Weg in der Betontechnologie ab. Durch speziell ausgewählte Zusätze und eine modifizierte Zusammensetzung kann der Frischbeton so eingestellt werden, dass er sich während und unmittelbar nach dem Einbau allein durch die Schwerkraft selbst verdichtet. Dadurch kann die bisher unabdingbare Verdichtung komplett entfallen. Gleichzeitig können sich weitere günstige Eigenschaften für das damit hergestellte Betonbauwerk ergeben.

2 Charakteristika von selbstverdichtendem Beton

Selbstverdichtender Beton ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an zähflüssigem Bindemittel-leim. Dadurch kann selbstverdichtender Beton von sich aus nahezu bis zum vollständigen Niveaueingleich fließen (Bild 1). Gleichzeitig entlüftet er während des Fließens praktisch vollständig ohne jegliche äußere Verdichtungsenergie. Seine Konsistenz ist so weich, dass sich bei einem Ausbreitversuch nach DIN 1048 auch ohne Anheben/Fallenlassen der Tischplatte ein Ausbreitmaß über 70 cm einstellt (Bild 2).

Bild 1 Einbau von Beton in ein bewehrtes U-Rohr.
Links: Selbstverdichtender Beton
Rechts: Herkömmlicher Rüttelbeton (ohne Verdichtung)





In den meisten bisherigen Untersuchungen wurde dies durch einen gegenüber herkömmlichem Rüttelbeton wesentlich höheren Mehlkorngesamt erreicht. (Mehlkorn sind alle Feinststoffe größer als 0,125 mm, also Zement, Zusatzstoffe und Feinstsand unter dieser Korngröße).

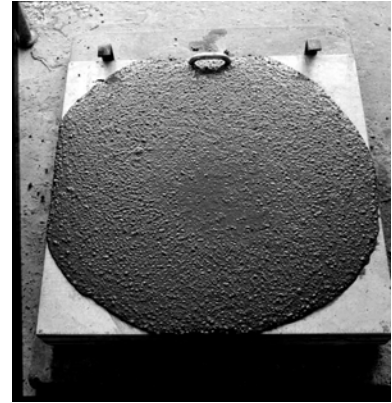


Bild 2 Ausbreitmaß von selbstverdichtendem Beton (ohne Anheben/Fallenlassen der Tischplatte)

Vergleich mit Rüttelbeton

Bei Rüttelbeton wird in der Regel angestrebt, eine möglichst dichte Packung der Zuschlagkörner zu erzielen. Der Anteil an Körnern über 0,125 mm beträgt dort meist 70 Vol.-% und mehr. Der Bindemittelteil mit einem Anteil von unter 30 Vol.-% hat die vordringliche Aufgabe, die einzelnen Zuschlagkörner fest miteinander zu verkitten. Der Mehlkorngesamt beträgt dabei meist 350 bis 400 kg/m³.

Bei selbstverdichtendem Beton hingegen beträgt der Leimanteil rd. 40 Vol.-% und mehr. Dazu ist ein Mehlkorngesamt meist im Bereich von 500 bis 600 kg/m³ notwendig. Dies wird in der Regel durch einen höheren Anteil an Flugasche oder die Zugabe weiterer feiner Zusatzstoffe wie z. B. Kalksteinmehl bei Beibehaltung des Zementgehalts herbeigeführt. Bedingt durch die Erhöhung des Gehalts an Bindemittelteil ist der Anteil an größerem Zuschlag verringert.

Mit neuartigen Fließmitteln, meist auf Basis von Polycarboxylat, wird auch bei Einhaltung des geforderten Wasserzementwerts ein stabiler Bindemittelteil erreicht. In dieser Suspension „schwimmen“ jetzt quasi die größeren Zuschlagkörner, ohne sich untereinander im Fließverhalten stärker zu stören und ohne zu entmischen.

Sensibilität von selbstverdichtendem Beton

Die bisherigen Untersuchungen und Praxiserprobungen zeigen allerdings auch eine vergleichsweise hohe Sensibilität des Frischbetons gegenüber Schwankungen in den Betonausgangsstoffen und der Betonzusammensetzung (Bild 3). Weicht bei herkömmlichem Beton beispielsweise der Wassergehalt im Frischbeton um wenige Liter je m³ vom Idealwert nach unten ab, so ist die Konsistenz nur minimal geringer. Bei einer geringen Überschreitung des Sollwerts besteht in der Regel auch noch keine Gefahr der Entmischung. Hingegen hat sich bei selbstverdichtendem Beton gezeigt, dass bei einer nur mini-

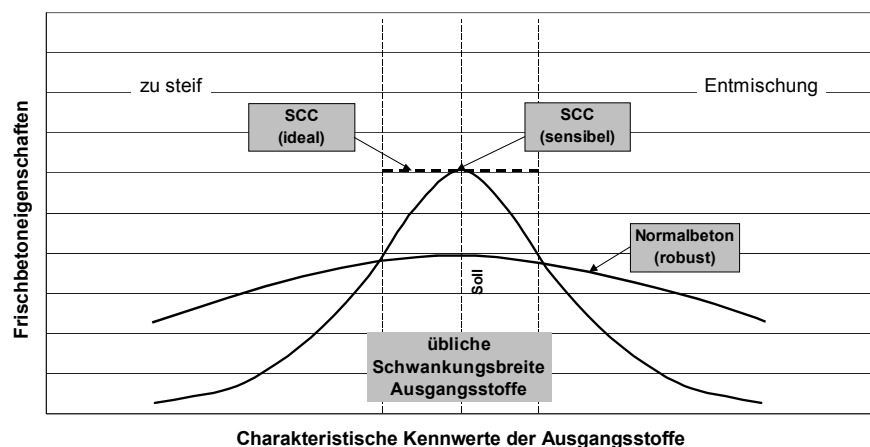
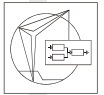


Bild 3 Vergleich der Sensibilität von selbstverdichtendem Beton und herkömmlichem Rüttelbeton gegenüber Schwankungen in den Ausgangsstoffen oder in der Zusammensetzung

malen Unterschreitung des optimalen Wassergehalts der Beton nicht mehr ausreichend fließfähig wird und sich nicht mehr selbst ausreichend entlüften kann. Hingegen wurde schon bei nur geringfügiger Überschreitung des Sollwerts ein Entmischen beobachtet.



Für eine breite Anwendung von selbstverdichtendem Beton muss daher dessen Robustheit noch verbessert werden. Auch unter heutigen Praxisbedingungen muss ein zielsicherer Betoneinbau sichergestellt sein. Erste Ansätze hierzu zeichnen sich durch die Zugabe von stabilisierenden Zusätzen ab. Bei diesem als „Stabilisierer-Typ“ benannten selbstverdichtenden Beton kann der Mehlkorngehalt u. U. auch wieder etwas reduziert werden.

Festbetoneigenschaften

Bedingt durch den höheren Mehlkornanteil können sich auch die Festbetoneigenschaften des selbstverdichtenden Betons von denen herkömmlicher Rüttelbetone unterscheiden. Insbesondere können sich der Elastizitätsmodul etwas niedriger, Kriechen und Schwinden hingegen höher einstellen als bei üblichen Betonen gleicher Festigkeit. Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass diese Verformungskennwerte auch bei herkömmlichen Betonen je nach Herkunft der Ausgangsstoffe erheblich (bis $\pm 40\%$!) voneinander abweichen können. Bedingt durch die bei uns vorwiegend auf Flugasche beruhende Erhöhung des Mehlkorngehalts werden meist höhere Betonfestigkeiten (zwischen 40 und 60 N/mm²) als bei herkömmlichen Betonen erreicht, oft auch dann, wenn nur Festigkeiten der Klasse B 25 oder B 35 angestrebt werden.

3 Vorteile durch Einsatz von selbstverdichtendem Beton

Durch die Fähigkeit, sich während des Einbaus selbst zu entlüften, kann bei selbstverdichtendem Beton jeglicher externer Verdichtungsaufwand entfallen. Dadurch kann auch auf den sonst notwendigen lagenweisen Einbau mit Schütthöhen von max. 50 cm verzichtet werden. Die Einbauleistung wird insbesondere bei hohen Betonbauteilen deutlich gesteigert.

Als weiterer Vorteil der nicht mehr notwendigen Verdichtung wird häufig angeführt, dass damit auch die mit Rüttlern verbundene Lärmentwicklung entfällt. Aus Arbeitsschutzgründen wirkt sich dies sicherlich positiv in geschlossenen Fertigteil-Produktionshallen aus. Auch auf Ortbetonbaustellen wird das Arbeiten dadurch erleichtert.

Das extrem gute Fließverhalten von selbstverdichtendem Beton ermöglicht es, diesen auch über weite Strecken und an Hindernissen vorbei horizontal verlaufen zu lassen. Insbesondere bei waagrechten Stahlbetonbauteilen (z. B. Bodenplatten), in denen sonst im Abstand von etwa 1 bis 1,5 m zahlreiche Einfüllöffnungen und Verdichtungsgassen vorzusehen sind, kann auf diese weitgehendst verzichtet werden. In solchen Fällen ist es ausreichend, etwa alle 8 bis 10 m punktuell eine Einfüllöffnung vorzusehen.

Weiterhin bewirkt das gute Fließverhalten, dass die Bewehrung wie auch andere Einbauteile vollständig umhüllt und damit fehlerstellenfrei in das Betongefüge eingebettet sind. Dies macht den Betoneinbau insbesondere bei dichtbewehrten Bauteilen sicherer. Allerdings darf dies nicht dazu führen, dass bei der Konstruktion von Stahlbetonbauteilen noch höhere Bewehrungsgrade als heute eingeplant werden.

Sowohl das gute Fließverhalten als auch die selbständige Entlüftung von selbstverdichtendem Beton führen darüber hinaus zu einer nahezu porenfreien Betonoberfläche. Dies kann vor allem die Herstellung von Sichtbetonbauteilen erleichtern.

Die höhere Sicherheit gegenüber Betonierfehler verbessert generell die Qualität des eingebauten Betons. Der Aufwand für sonst oft notwendige Nachbesserungen kann deutlich reduziert werden.

Die hier beschriebenen günstigen Eigenschaften lassen erkennen, dass sich durch selbstverdichtenden Beton nahezu auf der ganzen Breite des Betonbaus Vorteile ergeben können. Damit hat selbstver-



dichtender Beton – im Gegensatz zu Sonderbetonen, wie z. B. hochfester Beton –, das Potenzial, nicht nur in begrenzten Sonderbereichen eingesetzt zu werden, sondern als Massenbaustoff den herkömmlichen Rüttelbeton über weite Bereiche abzulösen.

4 Voraussetzungen für breite Anwendung

Bevor selbstverdichtender Beton in dieser Breite Eingang in den Betonbau in Deutschland finden kann, sind jedoch noch einige Voraussetzungen zu schaffen. Neben der bereits dargestellten Notwendigkeit der Verbesserung in seiner Robustheit gegenüber praxisüblichen Schwankungen in den Ausgangsstoffen und Zusammensetzungen muss für eine breitere Anwendung die Wirtschaftlichkeit gegeben sein.

Wirtschaftlichkeit

Selbstverdichtender Beton ist aufgrund seiner modifizierten Ausgangsstoffe und Zusammensetzung vom Stoffpreis her zunächst teurer als herkömmlicher Beton mit gleichem Profil der Festbetoneigenschaften. Der Mehrpreis (zwischen rd. 25 und 35 DM/m³) muss sich durch entsprechende Einsparungen bei der Verarbeitung und durch weitere Vorteile kompensieren lassen.

Durch den Wegfall des Verdichtungsaufwands können derzeit je nach Bauteil zwischen 5 und 12 DM/m³ eingespart werden. Bewertet man die höhere Einbauleistung nochmals in ähnlicher Größenordnung, so zeigt sich, dass die Stoffmehrkosten noch nicht vollständig ausgeglichen werden können. Leider sind die darüber hinausgehenden Vorteile, wie zielsicherer (robuster) Betoneinbau, verbesserte Qualität der Betonoberflächen und damit weniger Nacharbeiten, nicht genau bezifferbar. Bezieht man diese Effekte in den Vergleich mit ein, so lassen sich durchaus auch wirtschaftliche Vorteile beim Einsatz von selbstverdichtendem Beton abbilden.

Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass nicht anderweitige Aufwendungen durch besondere Maßnahmen hinzukommen.

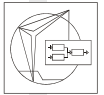
Bauaufsichtliche Regelungen

In Deutschland ist selbstverdichtender Beton heute nicht durch ein allgemein gültiges Regelwerk abgedeckt. Im Vergleich zu den Vorgaben in DIN 1045 überschreitet dieser Beton das oberste genormte Konsistenzmaß und bei Außenbauteilen in der Regel auch den aus Dauerhaftigkeitsgründen nach oben begrenzten Mehlkorngesamt. Daher ist für den Einsatz von selbstverdichtendem Beton bis heute eine aufwändige und zeitraubende bauaufsichtliche Zustimmung im Einzelfall notwendig. Für stationäre Fertigteilproduktionen und ein Transportbetonwerk sind zwischenzeitlich auch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen erteilt. Für eine breite Anwendung stellt dieser Aufwand jedoch ein großes Hindernis dar. Um diesen Zustand zu verbessern, wäre die baldige bauaufsichtliche Einführung der vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton erarbeitete und auch schon veröffentlichte Richtlinie für den Einsatz von selbstverdichtendem Beton hilfreich.

Bemessung

Eine weitere Voraussetzung für eine breite Anwendung ist ferner, dass Bauteile mit selbstverdichtendem Beton nach denselben Regeln wie herkömmlicher Beton nach DIN 1045 bemessen werden können. Würde für diesen Beton ein eigenes Bemessungsverfahren notwendig werden, so müsste bereits weit im Vorfeld ohne jegliche Kenntnisse des Bauablaufs und anderer Details festgelegt werden, ob das Bauteil/Bauwerk mit herkömmlichem Rüttelbeton oder mit selbstverdichtendem Beton hergestellt werden soll. Andernfalls besteht das Risiko, dass eine auf Rüttelbeton abgestimmte Bemessung bei einer späteren Entscheidung für selbstverdichtenden Beton oder umgekehrt mit doppeltem Aufwand nochmals komplett durchgeführt werden muss. Unter Berücksichtigung, dass auch bei herkömmlichen Betonen die bemessungsrelevanten Eigenschaften je nach Herkunft der Ausgangsstoffe und Zusammensetzung des Betons erheblich von den in DIN 1045 vorgegebenen Bemessungswerten abweichen

können (vgl. oben), kann aufgrund der bisher bekannten Forschungserkenntnisse nach Ansicht des Verfassers selbstverdichtender Beton in die gleiche Bemessungscharakteristik wie Beton nach DIN 1 045 eingebracht werden.



Qualitätssicherung

Auch im Rahmen der Qualitätssicherung darf selbstverdichtender Beton nicht unnötig verteuert werden. Daher sollen im Regelfall nur solche laufenden Prüfungen festgeschrieben werden, die für den zielsicheren Umgang mit diesem Baustoff notwendig sind. Selbstverdichtender Beton unterscheidet sich primär nur in seinen Frischbetoneigenschaften von denen herkömmlicher Betone. Dementsprechend gilt es, im Rahmen der Qualitätssicherung im Transportbetonwerk und auf der Baustelle speziell das Fließverhalten und die Stabilität gegen Entmischungen zu erfassen. Anstelle der üblichen Prüfung des Ausbreitmaßes nach DIN 1 048 wird aufgrund nach Untersuchungen an der TU Darmstadt in der DAfStb-Richtlinie voraussichtlich vorgeschlagen, die Leistungsfähigkeit des angelieferten Frischbetons mit dem so genannten J-Ring-Versuch zu überprüfen. Dabei wird der Frischbeton in einen Konus (z. B. Setztrichter aus dem Ausbreitversuch) gefüllt. Um diesen Konus herum wird außen ein Metallring mit in regelmäßigen Abständen angeordneten Bewehrungsstäben aufgestellt. Nach dem Ziehen des Konus muss der Frischbeton von selbst durch diese Hindernisse laufen. Bestimmt werden die Zeit bis zum Zurücklegen einer definierten Strecke sowie der Durchmesser am Ende des Fließvorgangs. Gleichzeitig wird optisch beurteilt, ob der Frischbeton zum Entmischen neigt oder ob sich gröbere Zuschläge vor den Hindernisstäben so konzentrieren, dass sie das Durchlaufen des Betons blockieren. Für alle anderen Eigenschaften müssen die Prüfungen in Art und Umfang denen bei herkömmlichen Betonen entsprechen.

Bauausführung

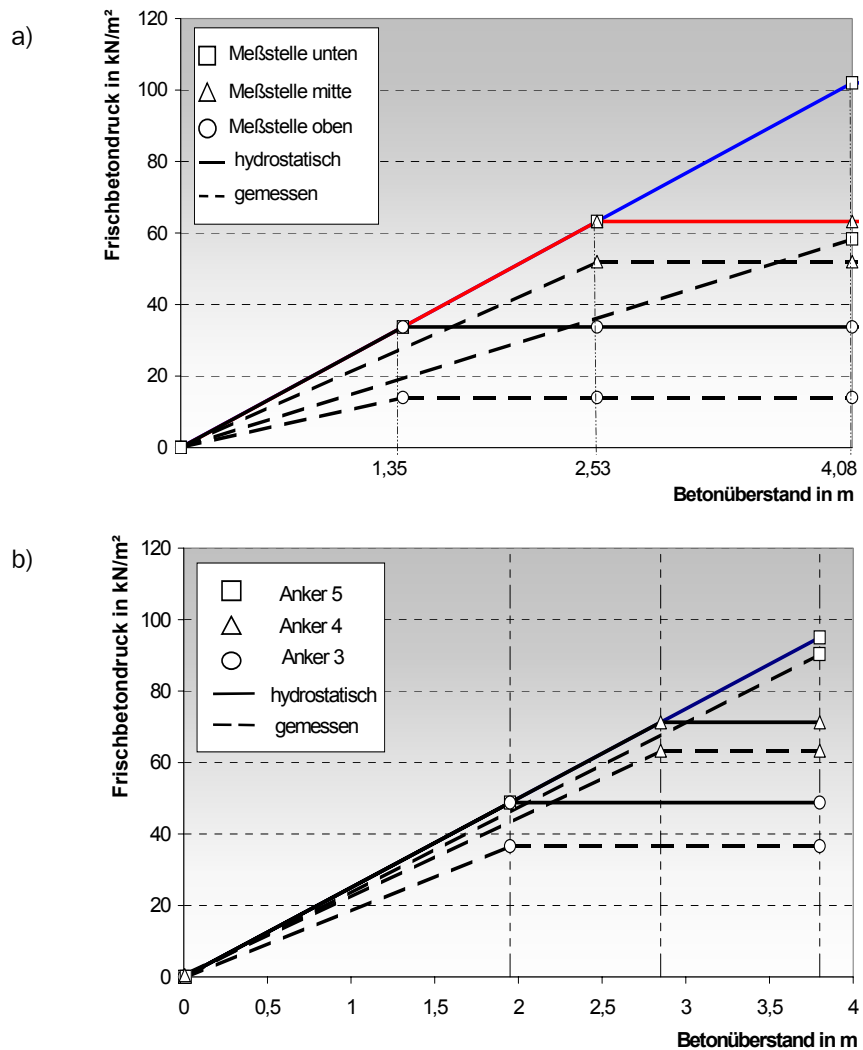
Neben diesen Voraussetzungen im Vorfeld muss auch bei der Bauausführung sichergestellt sein, dass keine zusätzlichen verteuernenden Maßnahmen notwendig werden. Zunächst könnte man annehmen, dass sich aufgrund der niedrigeren Viskosität und des guten Fließverhaltens von selbstverdichtendem Beton beim Einbau ein höherer Frischbetondruck auf die Schalung einstellt. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob die Schalung im Bereich von Stößen, Durchdringungen usw. intensiver abgedichtet werden muss als bei Verwendung herkömmlicher Rüttelbetone.

5 Untersuchungen zum Einbau von selbstverdichtendem Beton

Zur Klärung dieser Frage wurden von der PHILIPP HOLZMANN AG Untersuchungen zum Einbau von selbstverdichtendem Beton durchgeführt.

Frischbetondruck

In eine 4 m hohe Wandschalung wurde selbstverdichtender Beton mit einer Steiggeschwindigkeit von 5 m/h eingebracht. An den Schalungsankern waren Kraftmessdosen installiert, die die Ankerkräfte über den gesamten Betonierzeitpunkt kontinuierlich erfassten. Nach Umrechnung über die jeweilige Einflussfläche des Schalungsankers zeigte sich, dass sich bei dieser Steiggeschwindigkeit, wie sie für längere Wandabschnitte durchaus typisch sein kann, ein Frischbetondruck von rd. 60 % des hydrostatischen Drucks einstellte (Bild 4a). Dies entspricht in etwa dem Frischbetondruck eines herkömmlichen Rüttelbetons der Konsistenz KR nach dessen Verdichtung. Ergibt sich bei feingliedrigen Bauteilen, wie Stützen, durch die kontinuierliche Befüllung der Schalung mit selbstverdichtendem Beton eine deutlich höhere Steiggeschwindigkeit (z. B. 25 m/h), so kann der Frischbetondruck nahezu den hydrostatischen Druck erreichen (Bild 4b). Bei Schalungen für Stützen sind jedoch in der Regel die Schalungsanker aus konstruktiven Gründen so ausgelegt, dass sie auch die aus hydrostatischem Druck resultierenden Ankerkräfte aufnehmen können.



Bilder 4 Entwicklung des Frischbetondrucks von selbstverdichtendem Beton bei einer Steiggeschwindigkeit von
a) 5 m/h, b) 25 m/h

Betoniergeschwindigkeit – Entlüftung

Bei sehr schneller Befüllung einer Stützenschalung stellt sich als weitere Frage, ob der untere, zuerst eingebrachte Beton überhaupt in der Lage ist, sich selbst zu entlüften, wenn über ihm bereits größere Mengen an nachfolgendem Beton aufliegen. Anhand von Dichtemessungen zeigten sich keine Unterschiede, d. h. keine Beeinträchtigung der notwendigen Entlüftung, wenn der Frischbeton vor dem freien Fall in die Schalung auf einer leicht geneigten Rinne entlang geflossen ist und dabei die in dem zähen Leim eingeschlossene Luft entweichen konnte.

Entmischungsgefahr bei freiem Fall

Des Weiteren wurde untersucht, ob sich selbstverdichtender Beton bei freiem Fall über eine größere Höhe entmischt oder sein Fließvermögen beeinträchtigt wird. In einem Praxisversuch, bei dem der Frischbeton aus über 7 m frei fallend in einen Prüfkasten eingebaut wurde, zeigten sich keinerlei Entmischungen (Bild 5). Nach Ziehen eines seitlich angeordneten Schiebers ist der Frischbeton allein durch den Betonierdruck praktisch vollständig ausgelaufen (Bild 6). Daher kann man davon ausgehen, dass ordnungsgemäß zusammengesetzter selbstverdichtender Beton z. B. bei dichtbewehrten hohen Bauteilen auch im freien Fall ohne Beeinträchtigung seiner Eigenschaften vorteilhaft eingebaut werden kann.

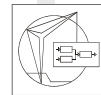


Bild 5 Probeeinbau von selbstverdichtendem Beton im freien Fall aus großer Höhe (links)

Bild 6 Fließfähigkeit von selbstverdichtendem Beton bis zum Niveaueausgleich (oben)

Schalungsstöße – Betonierfugen

Bei den angeführten Untersuchungen zeigte sich ferner, dass sorgfältig abgedichtete Fugen zwischen den einzelnen Schalungselementen ohne zusätzliche Maßnahmen ausreichend dicht sind und ein stärkeres Auslaufen von Feinmörtel nicht zu befürchten ist. In gleicher Weise können auch Stoßfugen mit durchlaufender Bewehrung konventionell abgeschalt werden. Auch durch übliche Abststellungen von Fugen mit Streckmetall war kein erhöhtes Auslaufen von Feinmörtel zu beobachten.

6 Ausblick

Selbstverdichtender Beton hat das Potenzial, in großer Breite in den Betonbau einzufließen. Seine besonderen Eigenschaften können vor allem einen zielsichereren und robusteren Einbau des Betons in das Bauwerk ermöglichen und damit die Qualität erheblich verbessern. Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung ist aber auch eine entsprechende Erfahrung und Sorgfalt beim Umgang mit diesem neuen Baustoff, sei es bei der Herstellung im Transportbetonwerk oder bei der Verarbeitung auf der Baustelle.

7 Literatur

- [1] Jacobs, F., Hunkeler, F., Schlumpf, J.: Self Compacting Concrete – Neue Entwicklungen für den Betonbau. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 12, März 1999, S. 238–242.
- [2] Grube, H., Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton. beton (1999), Heft 4, S. 239–244.
- [3] Seto, K., Okada, K., Yanai, S., Nobuta, Y.: Development and application of Self-Compacting Concrete. Proceedings of International Conference on Engineering Materials, June 1997, Ottawa Canada, pp. 413–429.